

# Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Elisabete F. Freitas<sup>1</sup>, Paulo A. A. Pereira<sup>2</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

## RESUMO

Os pavimentos rodoviários flexíveis, frequentemente, não desempenham as funções para as quais foram concebidos, observando-se uma redução prematura da sua qualidade.

A partir da observação da qualidade estrutural dos pavimentos, definida pelos parâmetros de estado deflexão e estado superficial, e do cálculo da vida residual, abordou-se neste artigo o estudo do desempenho estrutural de vários pavimentos submetidos a diferentes condições de solicitação. A análise do desempenho fez-se quer quanto à sua evolução, quer quanto aos factores que o podem influenciar.

Os resultados indicam que a qualidade de construção tem uma influência determinante na vida residual. Além disso, o conhecimento dos dados de projecto, a avaliação inicial da qualidade dos pavimentos, o desenvolvimento de modelos de correcção do módulo de deformabilidade e o controlo das causas de erro no cálculo da vida residual, são factores que permitem apoiar o estudo da evolução do desempenho dos pavimentos de uma forma mais fiável.

## 1. INTRODUÇÃO

A partir da Segunda Grande Guerra a rede rodoviária sofreu, na generalidade, uma enorme evolução, quer ao nível da sua extensão, quer ao nível do volume de tráfego e das respectivas cargas. Em Portugal esta evolução verificou-se numa forma mais notória com o Plano Rodoviário Nacional 85 (DL 380/85) e com a adesão à CEE em 1985, e posteriormente com o Plano Rodoviário Nacional 2000 (DL 222/98). Com a implementação destes planos verificou-se um grande aumento de extensão da rede construída. Actualmente, verifica-se também um aumento da necessidade de realização de acções de conservação para repor a qualidade, quer estrutural, quer funcional. A estas acções de conservação estão associados custos, quer para a administração da rede rodoviária, quer para os utentes. A análise destes custos, ao longo do ciclo de vida dos pavimentos, tem por objectivo avaliar as consequências de diferentes estratégias de conservação, resultantes das decisões de gestão da conservação dos pavimentos.

As decisões de conservação apoiam-se em informação, quer relativa ao estado passado, quer da previsão desse estado ao longo do tempo, de modo a otimizar a utilização dos recursos financeiros a investir na infra-estrutura rodoviária. Esta informação é tratada por ferramentas designadas por Sistemas de Gestão da Conservação.

---

<sup>1</sup> Assistente

<sup>2</sup> Professor Associado com Agregação

A avaliação da qualidade é a componente dos sistemas de gestão que procura compreender se os padrões de qualidade de serviço predefinidos, estão a ser atingidos, usando para tal a avaliação do estado observado (estrutural e funcional) (Matos, 1997).

A avaliação estrutural da qualidade procura definir o estado da estrutura do pavimento quanto à capacidade de suportar as cargas para que foi projectado, sob a acção de determinadas condições climáticas.

A avaliação funcional tem por objectivo definir a qualidade do pavimento, face às exigências dos utentes das estradas, nomeadamente quanto ao conforto e à segurança.

Frequentemente, verifica-se que os pavimentos apresentam uma degradação prematura da sua qualidade, quer estrutural, quer funcional.

O desempenho dos pavimentos, entendido como a capacidade de suportar as cargas do tráfego e como a capacidade de oferecer uma superfície de circulação confortável e segura, é estudado actualmente quanto à sua componente estrutural através da vida residual. Quanto à componente funcional o desempenho é estudado a partir da observação dos parâmetros de estado irregularidade longitudinal e transversal, atrito e degradações superficiais.

A vida residual dum pavimento é uma medida da sua capacidade de suportar cargas, definida pelo número de passagens de um eixo de referência que o conduzirá à ruína, num determinado momento da sua vida.

Para calcular a vida residual, é fundamental caracterizar-se, através de metodologias adequadas, quer o estado superficial dos pavimentos, quer a sua deformabilidade, assim como definir os parâmetros de caracterização mecânica dos materiais constituintes das camadas.

Assim, de modo a estudar-se o desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários analisou-se um vasto conjunto de secções representativas da rede rodoviária nacional, sendo a estrutura, a zona climática e o tráfego os principais critérios de selecção. Deste conjunto, determinou-se a vida residual de cinco secções em diversos anos, a partir das quais se procurou compreender o seu desempenho.

## 2. ESTUDO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

O desempenho estrutural dos pavimentos estuda-se correntemente a partir da análise da vida residual. O calculo da vida residual baseia-se numa metodologia que, a partir da observação da deflexão e do estado superficial, permite caracterizar estruturalmente o pavimento, e, assim, calcular o número de aplicações de carga admissíveis, através de leis de comportamento dos materiais.

Para realizar a avaliação da vida residual há vários parâmetros a ter em conta: a geometria do pavimento e as características dos materiais; a periodicidade de observação da deflexão e a respectiva análise; as condições de aplicação de carga; o efeito da variação da temperatura e o respectivo modo de correcção; as leis utilizadas na previsão do módulo de deformabilidade. Além disso, é importante conhecer a influência de todas as fontes de erro decorrentes do processo de cálculo da vida residual.

Este trabalho resultou da selecção de 23 secções de estudo, distribuídas ao longo de todo o país (Figura 1), das quais se seleccionaram 5 secções (90, 190, 161, 162 e 253) com o objectivo de estudar a evolução do desempenho estrutural dos respectivos pavimentos (Freitas, 2001). Nestas 5 secções foram realizados ensaios de caracterização complementares, sobre materiais recolhidos em sondagens por poços, realizadas no ponto característico respectivo, nomeadamente o CBR, donde se determinaram novas espessuras. O ponto característico representa a deflexão correspondente ao percentil de 85% de todas as bacias de deflexão observadas de 50 em 50 m na secção, para o mês com deflexão máxima mais elevada.

O estudo do desempenho estrutural desenvolveu-se em três fases, às quais correspondem três hipóteses de cálculo da vida residual.

Na primeira fase considerou-se a espessura de cada uma das camadas que constituem os pavimentos, determinada a partir de sondagens por poços. Excepcionalmente, os dados relativos à secção 253 são dados de projecto. Além disso, considerou-se que as características físicas e mecânicas dos materiais correspondem às indicadas no manual de dimensionamento da Junta Autónoma de Estradas (JAE, 1995).

Na segunda fase considerou-se a espessura de cada uma das camadas do pavimento determinada a partir da realização de novas sondagens no ponto característico. As características físicas e mecânicas consideraram-se as mesmas da fase 1.

Na terceira fase consideram-se as espessuras representativas da deformabilidade da secção e as características de resistência do solo de fundação determinadas em laboratório. Além disso, efectuou-se uma correcção do valor da deflexão medida com o deflectómetro de impacto (FWD).

Para além do estudo da evolução do desempenho, a comparação da vida residual calculada em cada uma das fases permitirá avaliar o efeito das variações de espessura ao longo das secções, assim como avaliar o efeito das fontes de erro, nomeadamente as referentes aos equipamentos de observação.

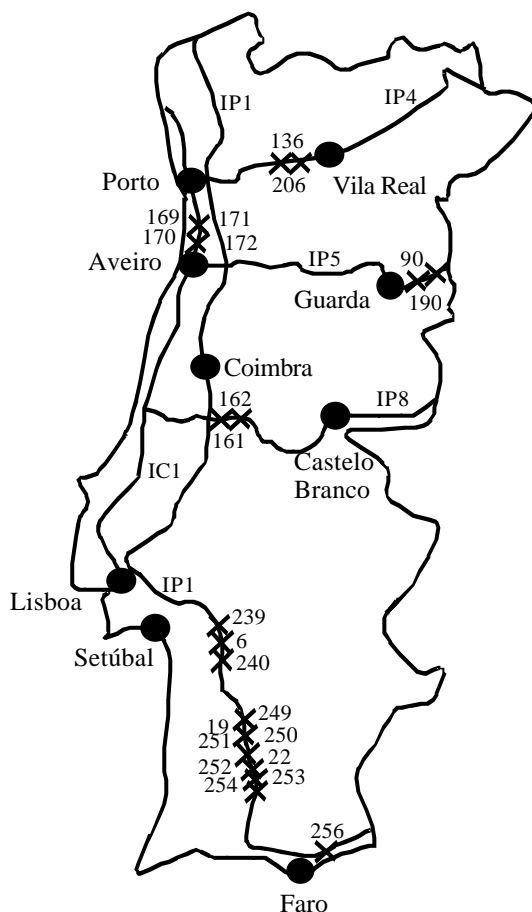


Figura 4.1 – Mapa de localização das secções de estudo

### 3. CARACTERIZAÇÃO DAS SECÇÕES DE ESTUDO

As secções de estudo foram caracterizadas, com base na realização de sondagens por poços, quanto à espessura e tipo de materiais, e quanto às características mecânicas do solo de

fundação. Além disso, foram realizadas várias observações do estado superficial com o equipamento DESY, em diferentes anos e em diferentes meses, simultaneamente com a medição da deflexão através do deflectómetro de impacto.

Numa primeira fase realizaram-se duas sondagens em cada secção de 500 m de extensão, respectivamente a 125 m do início e do fim. Numa segunda fase, após a análise da deflexão, realizou-se uma terceira sondagem localizada no ponto característico da secção. No Quadro 1 apresenta-se as espessuras das camadas obtidas e a respectiva descrição do material constituinte.

A espessura das camadas que constituem os pavimentos apresentam variações significativas em distâncias relativamente pequenas, quer quanto à componente betuminosa, quer quanto à componente granular. No caso da secção 253, não se verifica qualquer semelhança entre a estrutura de projecto e a estrutura obtida na sondagem.

A partir da medição da espessura em 8 pontos das lajes retiradas nas sondagens efectuadas (Quadro 2) verificou-se que numa área inferior a 1 m<sup>2</sup> existem diferenças de espessura importantes, nomeadamente na secção 161, com uma diferença de 1,8 cm.

As características mecânicas do solo de fundação (Quadro 3), avaliadas pelo CBR respectivo, classificam-se entre uma resistência razoável a muito boa, nomeadamente para a secção 161, em que o CBR tem o valor de 53%. Estes valores são ligeiramente superiores aos indicados pelo manual de dimensionamento da JAE para materiais da mesma classe de fundação. O valor da expansão dos solos é muito reduzido ou nulo, indicando, assim, uma reduzida redução das propriedades mecânicas na presença de água.

Quadro 1 – Caracterização da estrutura das secções de estudo

Secção	Camada	Esp. inicial (cm)	Esp. ponto caract. (cm)	Descrição do material (2ª sondagem)
90	BB	17,9	18,0	Mistura betuminosa
	BG	32,5	18,0	Tout-venant granítico
	SbG	20,8	16,0	Tout-venant granítico
190	BB	22,2	23,0	Mistura betuminosa
	BG	35,0	15,0	Tout-venant granítico
	SbG	19,0	15,0	Tout-venant granítico
161	BB	26,0	21,5	(Cam. inferior facilmente desagregável)
	BG	14,3	16,0	Tout-venant granítico quartzoso
162	BB	18,8	22,5	Mistura betuminosa
	BG	18,5	20,0	Tout-venant granítico quartzoso
253	BB	9,0	13,7	Mistura betuminosa
		30,0 (BG)	7,0	Tout-venant calcário com argila
		40,0 (SbG)	20,0	Tout-venant calcário com argila
			7,0	Marga calcária ligada com betume
			13,0	Calcário alterado
			5,0	Quartzite ligado com betume
			8,0	Tout-venant calcário (alterado)

Nota: a secção 162 tem um perfil em escavação, as restantes secções têm um perfil em aterro.

Quadro 2 – Variação de espessuras da camada betuminosa

Secção N.º	Dimensão da laje (cm×cm)	E1 (cm)	E2 (cm)	E3 (cm)	E4 (cm)	E5 (cm)	E6 (cm)	E7 (cm)	E8 (cm)	Desvio max. (cm)
90	62×100	18,2	18,0	19,0	18,2	–	–	–	–	1,0
190	Med. num lado	23,2	23,1	–	–	–	–	–	–	0,1
161	106×83	22,0	20,8	22,5	22,0	22,5	21,5	22,0	22,6	1,8
162	92×90	22,5	22,5	22,2	22,5	22,0	22,5	22,0	21,5	1,0
253	92×103	13,6	13,5	14,0	12,7	13,5	14,0	13,9	14	1,3

O estado superficial foi observado nos meses de Setembro de 1997, Abril de 1998 e Julho de 2000 sendo esta última observação acompanhada duma observação mais rigorosa do ponto característico de cada secção. No Quadro 4 apresenta-se a densidade de degradação (percentagem da extensão da secção que apresenta degradações) ao longo do tempo e o estado superficial no ponto característico. A densidade de degradação não apresenta uma evolução coerente devido a diversas intervenções de conservação, cujas técnicas ocultam o estado real da superfície do pavimento.

A observação da deflexão foi efectuada quatro vezes entre 1997 e 2000, quer no Verão, quer no Inverno (Quadro 5). A deflexão máxima apresenta, de uma forma geral, valores de deformabilidade médios, cerca de 400  $\mu\text{m}$ , para as secções 161, 162 e 190. A secção 90 apresenta valores de deflexão da ordem dos 800  $\mu\text{m}$ , o que se correlaciona bem com o estado superficial observado.

A evolução da deflexão ao longo do tempo é aleatória, não sendo possível definir entre os meses observados um padrão de comportamento. No entanto, salienta-se que a última observação foi realizada sob temperaturas da ordem dos 40 °C.

Quadro 3 – Características mecânicas do solo de fundação

Secção N.º	CBRadp (%)	CBR (%)	W <sub>n</sub> (%)	W <sub>op</sub> (%)	$\gamma_d$ (g.cm <sup>-3</sup> )	Expansão (%)	Água absorvida (%)
90	10	20	7,7	9,7	2,05	0,0	0,05
190	5	22	10,0	9,6	2,04	0,5	0,66
161	5	53	8,7	8,4	2,18	0,1	0,76
162	10	15	14,7	12,7	1,96	0,2	3,45

Quadro 4 – Caracterização do estado superficial

Secção	Mês			ES (ponto característico)
	Set. 97	Abr. 98	Jul. 00	
90	97	100	99	ES4
161	0	8	4	ES0
162	88	97	89	ES1
190	100	100	8	ES0

Quadro 5 – Caracterização da deflexão

Secção N.º	Mês	Deflexão medida ( $\mu\text{m}$ )									Temperatura (°C)			
		0	30	45	60	90	120	150	210	240	Tar	Tcam	Tsup.	Hora
90	Ab97	629	461	366	279	163	107	68	36	23	17,0	14,0	–	–
	Dz97	908	666	536	406	202	111	67	33	27	9,5	8,4	–	13:10
	Mr98	854	587	448	321	153	79	52	23	14	23,0	25,6	–	16:30
	Jn98	844	578	433	318	166	97	60	25	17	17,0	15,0	–	9:40
	St00	784	540	405	276	136	74	52	38	30	–	40,5	–	14:50
161	Ab97	362	279	233	194	127	83	52	26	22	11,0	13,0	–	–
	Dz97	375	289	249	215	150	99	62	28	20	3,9	7,0	–	2:25
	Mr98	523	402	320	250	133	76	46	23	18	13,0	13,6	–	10:50
	Jn98	771	487	346	249	126	66	42	27	16	23,0	29,0	–	20:15
	St00	573	414	335	238	130	72	44	32	27	–	–	36,7	16:40
162	Ab97	259	205	174	148	103	74	53	29	21	18,0	14,7	–	–
	Dz97	305	262	234	202	147	104	72	38	29	3,9	7,0	–	2:05
	Mr98	415	346	281	228	137	84	55	29	21	13,0	13,6	–	10:40
	Jn98	533	352	268	203	115	65	41	25	20	23,0	27,0	–	20:40
	St00	520	347	264	186	104	62	42	30	24	–	–	37,4	16:55
190	Ab97	302	210	158	123	68	43	31	17	16	17,0	14,0	–	–
	Dz97	428	286	207	151	71	41	29	20	19	9,5	8,4	–	13:00
	Mr98	360	235	173	127	70	42	31	20	15	23,0	26,0	–	16:35
	Jn98	378	263	196	144	84	49	36	21	17	17,0	15,0	–	9:25
	St00	429	302	236	160	80	45	32	20	19	–	–	41,2	14:40

A deflexão apresenta valores semelhantes ou inferiores a alguns dos meses anteriores, contrariamente ao que seria de esperar, dado que o solo de fundação é pouco sensível à água e que as espessuras das camadas betuminosas são relativamente elevadas ( $> 180$  mm).

Quanto à forma da bacia de deflexão verifica-se que esta é alongada, uma vez que os seus valores são consideravelmente elevados até cerca de 240 cm do centro de aplicação da carga. Como este tipo de comportamento é pouco habitual, em Setembro de 2000 realizaram-se ensaios de capacidade de suporte com a viga Benkleman no ponto característico, de modo a confirmar a forma da bacia de deflexão obtida com o FWD, assim como a sua área de influência.

Na Figura 2 apresenta-se, para a secção 161, a sobreposição das bacias de deflexão obtidas com os dois equipamentos. As restantes bacias de deflexão têm um desenvolvimento semelhante. As diferenças obtidas na parte inicial da bacia devem-se, em princípio, à redução de rigidez da componente betuminosa devido à temperatura elevada.

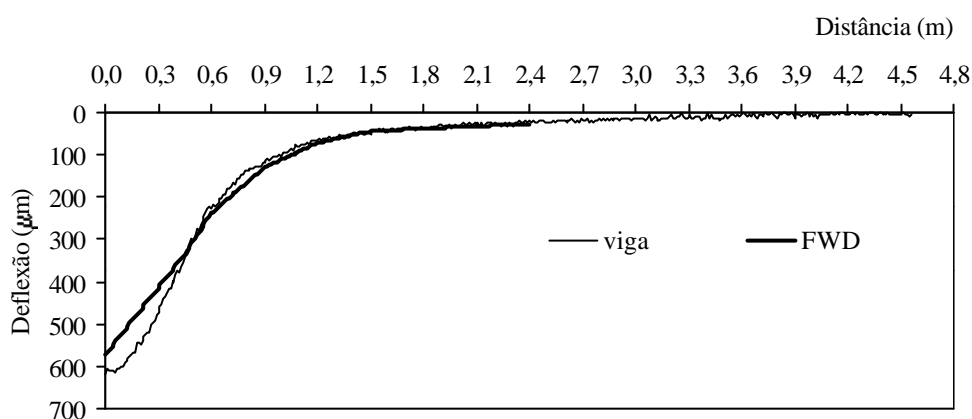


Figura 2 – Sobreposição das bacias de deflexão da secção 161

#### 4. CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

O módulo de deformabilidade calculou-se iterativamente, pelo método da análise inversa, considerando os seguintes dados: os valores da deflexão, a geometria e a natureza e estado das camadas do pavimento, e as propriedades do solo de fundação.

O método de análise inversa tem como primeiro passo a atribuição de módulos de deformabilidade a cada uma das camadas que constitui o pavimento. Após calcular a bacia de deflexão resultante da aplicação duma carga padrão, com a ajuda do programa de cálculo estrutural ELSYM5, comparam-se as deflexões calculadas com as deflexões observadas. Este procedimento repete-se até que o erro entre as deflexões medidas e as deflexões calculadas seja mínimo (Molenaar, 1994), obtendo-se deste modo os módulos representativos do estado estrutural do pavimento.

Para a primeira e para segunda fases, o ajuste das bacias de deflexão é aceitável apenas numa parte da bacia (Quadros 6 e 7). A partir de 150 cm do centro de aplicação da carga, a diferença entre as deflexões é quase sempre superior a 100%. Devido a esta dificuldade de ajuste, a qual impede a correcta modelação da estrutura, formulou-se uma terceira hipótese para os meses de Verão e de Inverno com maior deformabilidade. Nesta terceira fase, à deflexão medida com o deflectómetro de impacto retirou-se em todos os pontos o valor observado a 240 cm do centro de aplicação da carga. O ajuste obtido desta forma é superior ao obtido anteriormente (Quadro 8).

Quadro 6 – Deflexão medida / deflexão calculada (fase 1)

Secção N.º	Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm)									
	Mês	0	30	45	60	90	120	150	210	240
90	Ab97	629-612	461-442	366-344	279-273	163-171	107-105	68-61	36-16	23-6
	Dz97	908-945	666-618	536-460	406-344	202-191	111-104	67-53	33-8	27-1
	Mr98	854-865	587-612	448-459	321-345	153-192	79-104	52-53	23-9	14-1
	Jn98	844-818	578-580	433-445	318-341	166-195	97-107	60-56	25-9	17-1
	St00	784-783	540-517	405-390	276-300	136-177	74-103	52-57	38-12	30-3
190	Ab97	469-474	358-363	289-293	245-238	165-153	113-95	79-56	40-16	27-7
	Dz97	401-393	325-328	275-271	231-226	160-151	114-97	83-59	46-18	33-8
	Mr98	449-458	357-360	269-291	221-238	141-153	86-95	59-56	23-16	14-7
	Jn98	379-379	274-295	225-240	185-195	121-125	82-78	54-46	30-14	20-7
	St00	358-355	277-250	232-197	176-158	110-100	69-62	45-38	31-12	21-7
161	Ab97	362-374	279-293	233-243	194-199	127-125	83-72	52-38	26-6	22-1
	Dz97	375-367	289-287	249-239	215-195	150-123	99-71	62-37	28-6	20-1
	Mr98	523-514	402-373	320-296	250-229	133-128	76-64	46-28	23-1	18-0
	Jn98	771-729	487-455	346-352	249-267	126-143	66-68	42-26	27-0	16-0
	St00	573-570	414-370	335-290	238-223	130-123	72-61	44-26	32-1	27-0
162	Ab97	259-277	205-213	174-174	148-138	103-82	74-46	53-23	29-5	21-3
	Dz97	305-317	262-269	234-225	202-186	147-120	104-71	72-38	38-7	29-2
	Mr98	415-394	346-313	281-258	228-208	137-125	84-68	55-33	29-4	21-0
	Jn98	533-535	352-379	268-297	203-227	115-123	65-60	41-25	25-0	20-0
	St00	520-545	347-344	264-256	186-186	104-93	62-42	42-17	30-1	24-1

Quadro 7 – Deflexão medida / deflexão calculada (fase 2)

Secção N.º	Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm)									
	Mês	0	30	45	60	90	120	150	210	240
90	Ab97	629-670	461-462	366-356	279-272	163-151	107-78	68-36	36-2	23-0
	Dz97	908-903	666-606	536-461	406-346	202-186	111-92	67-39	33-0	27-0
	Mr98	854-829	587-574	448-429	321-318	153-166	79-80	52-34	23-0	14-0
	Jn98	844-898	578-573	433-428	318-317	166-166	97-80	60-34	250	17-0
	St00	784-816	540-500	405-367	276-268	136-138	74-66	52-28	38-1	30-0
190	Ab97	469-443	358-367	289-305	245-253	165-163	113-98	79-54	40-10	27-1
	Dz97	401-402	325-345	275-289	231-242	160-161	114-99	83-57	46-12	33-3
	Mr98	449-437	357-348	269-288	221-237	141-151	86-89	59-48	23-8	14-1
	Jn98	379-373	274-298	225-246	185-201	121-128	82-76	54-42	30-8	20-2
	St00	358-358	277-283	232-233	176-191	110-121	69-71	45-39	31-8	21-3
161	Ab97	362-368	279-286	233-234	194-188	127-113	83-61	52-30	26-4	22-1
	Dz97	375-360	289-301	249-253	215-209	150-133	99-78	62-41	28-6	20-1
	Mr98	523-534	402-409	320-330	250-260	133-148	76-75	46-32	23-0	18-0
	Jn98	771-752	487-491	346-376	249-280	126-143	66-64	42-22	27-0	16-0
	St00	573-586	414-397	335-308	238-233	130-124	72-58	44-23	32-0	27-0
162	Ab97	259-250	205-203	174-170	148-140	103-90	74-54	53-30	29-7	21-4
	Dz97	305-305	262-276	234-235	202-200	147-137	104-87	72-52	38-13	29-4
	Mr98	415-406	346-329	281-276	228-229	137-147	84-87	55-46	29-7	21-1
	Jn98	533-535	352-363	268-283	203-216	115-118	65-59	41-25	25-1	20-0
	St00	520-535	347-363	264-283	186-216	104-118	62-59	42-25	30-1	24-0

Os módulos correspondentes a cada uma das hipóteses formuladas apresentam diferenças significativas (Quadros 9, 10 e 11).

A diferença de comportamento entre as duas primeiras fases deve-se exclusivamente ao efeito da variação de espessura considerada como representativa da secção. Verifica-se que a uma diminuição da espessura das camadas granulares corresponde um aumento do módulo, quer das camadas granulares, quer das camadas betuminosas (secções 90 e 190). A uma diminuição da espessura da camada betuminosa corresponde um aumento do módulo da camada betuminosa (secção 161), e a um aumento da espessura betuminosa corresponde uma diminuição dos módulos em todas as camadas (secção 162).

Estas considerações não podem ser generalizadas, uma vez que o desempenho de um pavimento depende, entre outros factores, do estado dos materiais que o constituem e da espessura das camadas.

Quadro 8 – Deflexão medida corrigida / deflexão calculada (fase 3)

Secção N.º	Mês	Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm)								
		0	30	45	60	90	120	150	210	240
90	Dz97	881-890	639-591	509-447	379-335	175-182	84-94	40-45	6-6	0-1
	Jn98	827-829	561-514	417-385	301-289	149-159	80-84	43-42	8-7	0-2
190	Ab97	442-444	331-332	262-270	218-217	138-135	85-80	52-44	13-11	0-5
	Jn98	359-363	254-260	205-210	165-168	101-103	62-61	34-34	10-10	0-5
161	Mr98	505-495	384-376	301-299	231-233	115-131	58-68	28-32	5-5	0-2
	Jn98	755-756	471-439	330-320	233-229	110-112	50-51	26-22	11-3	0-2
162	Mr98	394-395	325-309	260-252	207-203	116-123	63-70	34-37	7-8	0-4
	Jn98	513-511	332-316	248-239	183-178	95-95	45-49	21-24	6-6	0-4

Quadro 9 – Módulos das secções de estudo (fase 1)

Secção N.º	Estrutura		Mês	Módulo (MPa)				Temperatura (° C)			
	Camada	Esp (cm)		Cam Bet.	Base	Subbase	Fundação	Tar	Tcam	Tsup.	Hora
90	CB	17,9	Ab97	2000	200	100	40	17	14	–	–
	Base	32,5	Dz97	1200	100	70	40	9,5	8,4	–	13:10
	Sub-base	20,8	Mr98	1200	100	70	40	23	25,6	–	16:30
			Jn98	1800	100	70	40	17	15	–	9:40
			St00	1300	150	90	40	–	40,5	–	14:50
161	CB	26	Ab97	3500	160	0	60	11	13	–	–
	Base	14,3	Dz97	3500	150	0	60	3,9	7	–	2:25
			Mr98	1500	150	0	58	13	13,6	–	10:50
			Jn98	1000	150	0	50	23	29	–	20:15
			St00	1400	175	0	60	–	–	36,7	16:40
162	CB	18,8	Ab97	8000	300	0	100	18	14,7	–	–
	Base	18,5	Dz97	9000	200	0	60	3,9	7	–	2:05
			Mr98	6000	200	0	60	13	13,6	–	10:40
			Jn98	3000	200	0	60	23	27	–	20:40
			St00	2000	220	0	80	–	–	37,4	16:55
190	CB	22,2	Ab97	2500	180	75	50	17	14	–	–
	Base	35	Dz97	4000	180	75	50	9,5	8,4	–	13:00
	Sub-base	19	Mr98	4000	180	75	50	23	26	–	16:35
			Jn98	3500	190	95	65	17	15	–	9:25
			St00	2800	285	130	80	–	–	41,2	14:40
253	CB	9	Ab97	6000	700	270	90	24,0	24,5	–	–
	Base	30	Dz97	3000	570	220	74	18,3	18,6	–	12:10
	Sub-base	40	Mr98	1500	600	230	80	27,2	29,1	–	17:15
			Jn98	3500	600	240	80	18,0	15,0	–	7:20
			St00	2200	550	230	75	–	–	38,9	11:35



Quadro 10 – Módulos das secções de estudo considerando as novas estruturas (fase 2)

Secção N.º	Estrutura		Mês	Módulo (MPa)				Temperatura (°C)			Hora
	Camada	Esp (cm)		Cam. Bet.	Base	Subbase	Fundação	Tar	Tcam	Tsup	
90	CB	18	Ab97	2000	190	95	50	17	14	–	–
	Base	18	Dz97	1400	135	70	40	9,5	8,4	–	13:10
	Sub-base	16	Mr98	1100	145	75	45	23	25,6	–	16:30
			Jn98	1200	145	75	45	17	15	–	9:40
			St00	1200	155	90	55	–	40,5	–	14:50
190	CB	23	Ab97	3600	190	85	45	17	14	–	–
	Base	15	Dz97	4400	200	85	45	9,5	8,4	–	13:00
	Sub-base	15	Mr98	3300	210	90	50	23	26	–	16:35
			Jn98	3900	235	115	60	17	15	–	9:25
			St00	4000	240	120	65	–	–	41,2	14:40
161	CB	21,5	Ab97	5000	140	0	70	11	13	–	–
	Base	16	Dz97	6200	140	0	55	3,9	7	–	2:25
	Sub-base	0	Mr98	2700	130	0	50	13	13,6	–	10:50
			Jn98	1300	130	0	50	23	29	–	20:15
			St00	2000	155	0	60	–	–	36,7	16:40
162	CB	22,5	Ab97	7300	220	0	90	18	14,7	–	–
	Base	20	Dz97	7800	150	0	50	3,9	7	–	2:05
	Sub-base	0	Mr98	4800	120	0	50	13	13,6	–	10:40
			Jn98	2000	150	0	65	23	27	–	20:40
			St00	2000	150	0	65	–	–	37,4	16:55

Quadro 11 – Módulos das secções de estudo considerando a deflexão corrigida (fase 3)

Secção N.º	Mês	Módulo (MPa)				Temperatura (°C)		Hora
		Cam. Bet.	Base	Subbase	Fundação	Tar	Tcam	
90	Dz97	1400	125	75	45	9,5	8,4	13:10
	Jn98	1100	185	100	50	17,0	15,0	9:40
190	Ab97	2700	225	120	62	17,0	14,0	–
	Jn98	2900	310	160	85	17,0	15,0	9:25
161	Mr98	2600	120	0	65	13,0	13,6	10:50
	Jn98	1000	140	0	70	23,0	29,0	20:15
162	Mr98	3500	150	0	70	13,0	13,6	10:40
	Jn98	1600	185	0	90	23,0	27,0	20:40

A diferença de comportamento entre a fase 2 e a fase 3 deve-se possivelmente a erros intrínsecos aos sensores de deflexão ou a uma recuperação lenta da deformação do pavimento. A sua avaliação permite estimar o efeito dos erros do processo de cálculo da vida residual.

Assim, a correcção dos valores de deflexão tem como consequência uma aumento generalizado dos módulos das camadas granulares e do solo de fundação, e uma diminuição considerável dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas, especialmente na secção 162 com uma redução de 1300 MPa.

## 5. CÁLCULO DA VIDA RESIDUAL

A vida residual define-se como o número de passagens dum eixo de referência que levará um pavimento à ruína, num determinado momento da sua vida. O cálculo da vida

residual em cada momento depende do tráfego passado e do critério de ruína utilizado de acordo com a Equação 1.

$$V_r = N_a - N_p \quad (1)$$

em que:

- $N_a$  = número admissível de passagens correspondente ao critério de dimensionamento condicionante;  
 $N_p$  = número de passagens correspondentes ao tráfego passado.

Antes do pavimento entrar ao serviço, o tráfego passado ( $N_p$ ) é nulo e a vida residual, neste caso definida como vida residual de construção, corresponde ao número total de passagens dum eixo de referência, calculado a partir do critério de ruína condicionante. Este número de passagens pode ser determinado tendo em conta, quer as condições estruturais de projecto, quer as condições estruturais reais, resultantes de um determinado nível de qualidade de construção.

Após o pavimento entrar ao serviço, a capacidade de suportar cargas vai diminuindo ao longo do tempo. A vida residual, neste caso definida como vida residual observada, corresponde ao número de passagens dum eixo de referência que o pavimento suportará a partir dum determinado momento da sua vida útil. Esta calcula-se a partir do critério de ruína condicionante, de fadiga ou de deformação permanente. O número de passagens do eixo de referência reflecte o estado estrutural do pavimento e, consequentemente, a evolução dos materiais que o constituem, definidos pela sua deformabilidade naquele momento.

Nos pontos anteriores definiram-se os principais parâmetros que constituem o modelo estrutural que traduz o estado do pavimento em diferentes momentos da sua vida útil.

A partir da análise do modelo estrutural de cada pavimento obtido desta forma determinam-se as extensões de tracção ( $\epsilon_t$ ) na base das camadas betuminosas, e as extensões de compressão ( $\epsilon_z$ ) no topo de solo de fundação. Estas extensões constituem um dos parâmetros dos critérios de ruína.

Os critérios de ruína utilizados são os desenvolvidos pela Shell e adaptados às condições portuguesas por Picado-Santos (1996). Na Equação 2 apresenta-se o critério de fadiga e na Equação 3 o critério de deformação permanente para uma probabilidade de sobrevivência de 95%.

$$N_f = \left( \frac{\epsilon_t}{(0,856 V_b + 1,08) S_{mix}^{-0,36}} \right)^{-5} \times f \quad (2)$$

em que:

- $N_f$  = resistência à fadiga (para 10% da área fendilhada);  
 $\epsilon_t$  = extensão de tracção;  
 $S_{mix}$  = rigidez da mistura betuminosa;  
 $V_b$  = volume de betume da mistura betuminosa.  
 $f$  = factor de conversão para condições de serviço  
 (10 se espessura > 200 mm; 15 se espessura > 100 e < 200 mm).

$$\epsilon_z = 569 \times \left( \frac{N}{10^6} \right)^{\frac{-1}{4}} \quad (3)$$

em que:

- $\epsilon_z$  = extensão admissível, em micro-unidades;  
 $N$  = número de repetições de carga.

O tráfego é um dos agentes de degradação que maior importância tem no estudo da evolução do desempenho dos pavimentos. Se a evolução do tráfego real for superior à estimada no projecto, em princípio, o pavimento terá uma vida útil inferior. Assim, a análise do tráfego passado real permite aferir se o pavimento apresenta ou não uma redução prematura das suas propriedades mecânicas, comparando a vida residual obtida pela Equação 1 com a vida residual observada.

O tráfego passado (NAEP) utilizado neste estudo é apresentado no Quadro 12 em função dos anos em estudo, baseia-se quer em contagens manuais, quer em contagens automáticas. A partir destas contagens, e com base no manual de dimensionamento da Junta Autónoma de Estradas (JAE; 1995), calculou-se a taxa de crescimento do tráfego, assim como se determinou o factor de agressividade, donde resultou o tráfego acumulado por período de tempo.

No Quadro 13 apresenta-se a vida residual de construção obtida para cada uma das fases acima apresentadas, para o critério dominante. O critério dominante é em todas as secções o critério de deformação permanente, referindo-se os respectivos parâmetros mecânicos à temperatura de serviço calculada com o programa PAVIFLEX (Baptista, 1999). As diferenças da vida residual de construção entre cada uma das fases são demasiado elevadas para se aceitar como válidas as hipóteses consideradas. Assim, o acesso aos dados de projecto é imprescindível para validar qualquer estudo do desempenho dos pavimentos.

A análise da vida residual observada (Quadro 14) só pode ser realizada em cada mês por comparação entre os resultados obtidos nas diferentes fases consideradas. A inexistência de modelos de correcção do módulo de deformabilidade, adequadamente validados para as condições portuguesas, é a razão que impossibilita uma análise fiável da evolução da vida residual ao longo do tempo.

Quadro 12 – Número acumulado de eixos de referência de 80kN por intervalo de tempo

Sec. Estudo	Ano cons	Número acumulado de eixos padrão de 80kN						Total
90	1987	<b>87-90</b>	<b>90-95</b>	<b>95-97</b>	<b>97-98</b>	<b>98-99</b>	<b>99-00</b>	
190		5276805	12150528	5862510	3124319	3260543	5954745	35629451
161	1993	<b>93-95</b>	<b>95-96</b>	<b>96-97</b>	<b>97-98</b>	<b>98-99</b>	<b>99-00</b>	
162		162486	188340	252945	262074	271560	482895	1620300

Quadro 13 – Vida residual de construção em eixos de 80 kN

Secção	90		190		161		162	
Fase	TS (°C)	Vr	TS (°C)	Vr	TS (°C)	Vr	TS (°C)	Vr
1	23,98	145	23,99	320	27,27	9,8	27,98	1,21
2	23,93	20,5	24,66	40	26,47	2,94	26,41	4,97
3	23,93	71,86	24,66	138	26,47	83	26,41	21,2

Quadro 14 – Vida residual observada em eixos de 80 kN

Secção	90					190				
Data	Ab. 97	Dz. 97	Mr. 98	Jn. 98	St.00	Ab. 97	Dz. 97	Mr. 98	Jn. 98	St.00
1ª fase	9,00	3,36	3,36	4,93	4,90	38,90	70,30	70,30	109,60	170,60
2ª fase	2,56	0,86	0,90	1,00	1,70	11,21	16,44	12,20	24,14	30,11
3ª fase	–	1,12	–	1,35	–	13,99	–	–	34,19	–
Secção	161					162				
Data	Ab. 97	Dz. 97	Mr. 98	Jn. 98	St.00	Ab. 97	Dz. 97	Mr. 98	Jn. 98	St.00
1ª fase	18,80	18,80	3,20	1,20	3,10	39,70	18,30	7,94	2,27	2,38
2ª fase	14,60	14,40	2,00	0,50	1,70	85,00	33,40	11,70	3,70	3,70
3ª fase	–	–	3,45	0,82	–	–	–	11,96	11,50	–

Em todas as secções se verifica que a vida residual tem variações muito elevadas, superiores a 100% em alguns casos, embora inferiores às observadas no Quadro 13. Assim, pequenas variações de espessura traduzem-se numa grande dispersão da vida residual observada. Além disso, pequenas correcções, tal como a efectuada no valor de deflexão observada resulta em grandes alterações na vida residual observada.

## 6. CONCLUSÕES

Neste estudo fez-se a análise de vários problemas, que permitirá no futuro calcular a vida residual com maior rigor, e assim, definir estratégias de conservação adequadas, evitando tomadas de decisão que se verifiquem desastrosas ao nível da gestão da conservação. Desta análise resultaram quatro conclusões fundamentais:

- 1) A qualidade de construção tem um influência fundamental na vida residual. As diferenças de constituição e de espessura encontradas nas cinco secções estudadas permitem diferentes interpretações do desempenho dos respectivos pavimentos, nomeadamente quanto ao estado dos materiais e quanto à capacidade de suportar cargas, devido à variação significativa dos valores calculados da vida residual.
- 2) Para se poder estudar correctamente a evolução do desempenho dos pavimentos é fundamental aceder-se ao projecto do pavimento, de modo a conhecer-se todas as opções tomadas e todos os cálculos efectuados pelo projectista.
- 3) É essencial conhecer-se a qualidade inicial dos pavimentos, assim como desenvolver-se modelos de correcção dos módulos, de modo a que se constituam referências na evolução do desempenho dos pavimentos.
- 4) É necessário estudar-se as possíveis causas de erro no cálculo da vida residual.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baptista M., Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos Métodos Existentes, Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Coimbra, 1999.

Decreto Lei n.º. 380/85, de 26 de Setembro de 1985.

Decreto Lei n.º. 222/98, de 17 de Julho de 1998.

Freitas E. F., Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, Trabalho de síntese apresentado no âmbito das provas de aptidão pedagógica e de capacidade científica. Universidade do Minho. Guimarães, 2001.

JAE, Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. Almada, 1995.

Matos A., A Observação de Pavimentos na Junta Autónoma de Estradas, Colóquio Sobre Conservação. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa, 1997.

Picado-Santos L., Método de Dimensionamento da Shell para Pavimentos Rodoviários Flexíveis (adaptação às condições portuguesas). Departamento de Engenharia Civil - F.C.U.C., 3ª edição. Coimbra, 1996.

Molenaar A.A.A., State of the Art of Pavements Evaluation. Proceedings. The 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. 2, pp 1781-1798. Minneapolis, 1994.